بررسی آزمایشگاهی تأثیرمشخصات هندسی و تسلیح ستون‌های سنگی شناور بر ظرفیت باربری★

نیما مهران نیا[۱] جواد نظری افشار[۲] فرزین کلانتری[۳]

چکیده *استفاده از ستون‌های سنگی در افزایش ظرفیت باربری خاک‌های ضعیف یکی از روش‌های متداول در بهسازی خاک‌ها می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از آزمایش‌های بزرگ مقیاس ظرفیت باربری ستونهای سنگی شناور در دو حالت مسلح و غیر مسلح مورد بررسی قرار گرفته است. ستونهای سنگی مورد استفاده در این تحقیق دارای قطر۶۰ میلی‌متر با طول ۲۰۰ و۳۵۰ میلی‌متر و قطر۸۰ میلی‌متر با طول ۴۰۰ میلی‌متر بوده و در تسلیح آنها از ژئوتکستایل بافته نشده استفاده شده است. نتایج بیانگر آن است که افزایش قطر و طول ستون سنگی و همچنین استفاده از ژئوتکستایل به عنوان غلاف ستون سنگی باعث افزایش ظرفیت باربری ستون سنگی شده است. افزایش قطر ستون سنگی موثرتر از افزایش طول آن است درواقع بهتر است به جای استفاده از ستون سنگی با طول زیاد و قطر کم، از ستون سنگی با قطر زیاد و طول مناسب استفاده نمود(نسبت طول به قطر بیشتر از ۵). با استفاده از غلاف ژئوتکستایل نسبت تمرکز تنش در ستون سنگی افزایش یافته و ظرفیت باربری افزایش پیدا میکند.مسلح نمودن ستون سنگی با قطر بیشتر، موثرتر از مسلح نمودن ستون سنگی با طول بیشتر است.*

واژه‌های کلیدی ستون سنگی، ظرفیت باربری، ژئوتکستایل، مسلح سازی، بهسازی زمین.

Experimental Investigation on the Effect of Geometry and Reinforced Floating Stone Columns on Bearing Capacity

N. Mehrannia J. Nazariafshar F. Kalantary

Abstract *Using stone column is an efficient method to increase bearing capacity of soft soils. In this research, the bearing capacity of flouting stone columns in reinforced and unreinforced modes were examined using large-scale laboratory tests. The stone columns used in this study are with 60mm diameter with 200 and 350mm length and 80mm diameter with 400mm length. These columns are reinforced with nonwoven geotextile. Results show that increasing in diameter and length of stone column and using geotextile as encased stone column increased bearing capacity of stone column. Increasing the diameter of stone column is more effective than increasing the length of stone column. In fact, it is better to use stone column with excessive diameter and proper length (length to diameter ratio more than 5) instead of excessive length and fewer diameters. By using geotextile encasement, stress concentration ratio increased and so bearing capacity improved. Encasing stone column with excessive diameter is more effective than excessive length.*

Key Words Stone Column, Bearing Capacity, Geotextile, Reinforcing, Ground Improvement.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۳/۳۰ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۳/۲۸ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی عمران، تهران، ایران.

(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار گروه مهندسی عمران، واحد شهرقدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

Email: j.nazariafshar@qodsiau.ac.ir

(۳) استادیار، عضو هیأت علمی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

مقدمه

از نظر مهندسین ژئوتکنیک، طبیعت ویژه نهشته های خاک نرم و خیلی نرم از مباحث مورد توجه برای تحقیق و بررسی می‌باشد. خاک‌های نرم در اکثر مناطق دنیا و همچنین در شهرهای مهم وجود دارند. برای ساخت یک سازه روی خاک نرم، مهندسین با نشست‌های زیاد و مقاومت برشی کم خاک مواجه هستند. به همین منظور، نیاز به بهبود پارامترهای مقاومتی چنین خاک‌هایی به شدت احساس می‌شود. استفاده از ستون‌های سنگی برای بهبود خاک نرم یکی از مؤثرترین شیوه‌های اصلاح ظرفیت باربری چنین خاک‌هایی می‌باشد. ستون سنگی ظرفت باربری خاک نرم را افزایش می‌دهد، نشستها را کاهش می دهد، زهکشی را تسریع می‌بخشد و در نهایت فشار آب حفره‌ای اضافه را مستهلک می‌کند. مزیت دیگر این روش آن است که به راحتی قابل ساخت و اجرا می‌باشد و در ساخت آن نیز نیاز به آرماتور یا سیمان نیست تا به صورت مستقیم یا غیر مستقیم به محیط زیست آسیب برساند.

اولین تحقیقات انجام شده در ارتباط با ستون سنگی توسط محققینی چون Greenwood[1]، Hughes و Withers [2] وMckenna et. al [3] انجام شده است. این محققین عملکرد مثبت ستون سنگی در ارتباط با افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست را در مقالات خود ذکر نموده اند. ستونهای سنگی در خاک‌های نرم اجرا می‌شوند و تقریبا تمام ظرفیت باربری خود را از فشار محصورکننده جانبی به دست می‌آورند و در واقع به واسطه فشاری که خاک پیرامون ستون سنگی به آن اعمال می‌کند پایدار می‌ماند (Greenwood [1]، [4] Barksdaleو Bachus [5] Gniel وBouazza [6] Ghazaviوnazari afshar). در آیین نامه آلمان (FGSV [7] استفاده از ستون های سنگی محدود به خاک های ریزدانه با مقاومت برشی زهکشی نشده بیشتر از ۲۵-۱۵ کیلوپاسکال شده است. با این حال در عمل در برخی موارد از ستون های سنگی در خاک های با مقاومت برشی کمتر از۱۰ کیلوپاسکال نیز استفاده شده است (Raju [8]).

اولین بار Van Impe [9] برای افزایش ظرفیت باربری ستونهای سنگی ایده استفاده از غلاف ژئوسینتتیکی را ابداع نمود. در واقع با استفاده از ژئوتکستایل محصور شده به دور ستون سنگی فشارجانبی افزایش یافته و ژئوتکستایل مانع از فرورفتن مصالح دانه ای ستون سنگی در خاک نرم میگردد و بنابراین ظرفیت باربری به طور چشمگیری افزایش می یابد. اگر خاک اطراف ستون سنگی دارای مقاومت برشی کمتر از ۱۵ کیلوپاسکال باشد استفاده از ستون سنگی معمولی مناسب نیست و باید از ستون سنگی مسلح استفاده شود[5] Gniel وBouazza [6] Ghazavi وNazari afshar. یکسری آزمایش مقیاس بزرگ توسط Christoulas et.al [10] روی ستونهای سنگی انجام شده است. نتایج حاصل مؤید آن است که شکم دادگی ستون سنگی در فاصله ۲/۵ تا ۳ برابر قطر ستون سنگی روی می‌دهد و بار نهایی در نشستی تقریباً برابر با ۳۵٪ قطر ستون سنگی اتفاق می‌افتد. Malarvizhi و Ilamparuthi

[11] برای بررسی اثرات مسلح کردن ستون‌های سنگی با استفاده از ژئوگرید روی ظرفیت باربری رس‌های نرم، یک سری آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام دادند. نتایج ثابت کرد که مسلح کننده استوانه ای ژئوگریدی، ظرفیت باربری هر دو نوع ستون‌های سنگی شناور و تکیه گاه انتهایی را افزایش می‌دهند. ظرفیت باربری نهایی درحالت ستون سنگی محصور شده با ژئوگرید ۲ تا ۳ برابر بیشتر از حالتی است که ستون سنگی بکار گرفته نمی‌شود.

Murugesan وRajagopal [12] نشان دادند که وجود مسلح کننده استوانه ای اطراف ستون سنگی، در مقایسه با ستون سنگی معمولی، ظرفیت باربری و سختی ستون سنگی را بالا برده و شکم دادگی کمتری دارد. Ghazavi و Nazari Afshar [6] ظرفیت باربری ستون‌های سنگی مسلح شده با ژئوسنتتیک‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که گسیختگی ستون سنگی منفرد به علت شکم دادگی

اتفاق می افتد. این شکم دادگی عموما در عمق D تا 2D (D قطر ستون سنگی) از سر ستون سنگی اتفاق می افتد و گسیختگی گروه ستون سنگی به صورت ترکیبی از شکم دادگی و تغییر شکل جانبی است. همچنین با بکارگیری ستون سنگی غیرمسلح ظرفیت باربری خاک نرم افزایش می یابد و در صورت به کارگیری ستون سنگی مسلح افزایش باربری و سختی خاک، افزایش بیشتری می یابد. همچنین با افزایش طول و مقاومت مسلح کننده ها ظرفیت باربری و سختی ستونهای سنگی افزایش می یابد.

Nazariafshar وGhazavi [13] به روش آزمایشگاهی به بررسی ظرفیت باربری ستون سنگی با مسلح کننده های ژئوسینتتیکی قائم و افقی پرداختند. نتایج نشان داد که با به کارگیری هر دو نوع مسلح کننده قائم و افقی مقدار انبساط جانبی ستون سنگی کاهش می‌یابد. هر دو مسلح کننده قائم و افقی باعث افزایش ظرفیت باربری ستون سنگی میشود ولی استفاده از مسلح کننده افقی مقرون به صرفه تر از مسلح کننده قائم است. یک روش تحلیل ساده برای محاسبه ظرفیت باربری ستون‌های سنگی توسط Nazariafshar و Ghazavi [14] ارائه شد. در این روش از دیوار حایل مجازی در لبه ستون سنگی استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی ستون سنگی ظرفیت باربری آن بیشتر میشود. بهترین نسبت فاصله به قطر در گروه ستون سنگی ۳ می باشد. همچنین کارایی ستون سنگی در خاکهای چسبنده نرم بیشتر است.

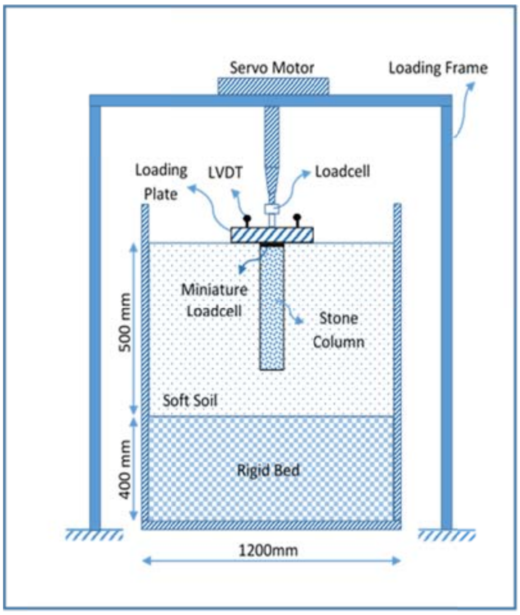
ستون‌های سنگی در نوع کوتاه و بلند تعریف میشوند و درواقع اگر نسبت طول به قطر ستون سنگی بیشتر از ۵ باشد ستون سنگی بلند است. در عمل بیشتر ستونهای سنگی از نوع بلند هستند. حال اگر ضخامت لایه نرم کم باشد، انتهای ستون سنگی بر روی لایه مقاوم قرار میگیرد ولی در اکثر پروژه ها طول ستونهای سنگی آنقدر زیاد نیست که به لایه مقاوم برسد و در بیشتر موارد ستون سنگی از نوع شناور است. در ستون سنگی شناور کوتاه بار اعمالی از طریق اصطکاک جداری ستون سنگی و خاک اطراف تحمل میشود در حالی که در ستون سنگی شناور بلند، عامل مهم طول باعث می شود که مکانیزم گسیختگی حاکم از نوع انبساط جانی بوده و تقریبا تمام بار از طریق اندرکنش بین جدار ستون سنگی و خاک اطراف منتقل شود و در نهایت ستون سنگی شناور بلند ظرفیت باربری بیشتری نسبت به ستون سنگی شناور کوتاه خواهد داشت.

در بیشتر تحقیقات گذشته ستون‌های سنگی بر روی بستر صلب قرار گرفته اند و تاثیر ستون‌های سنگی شناور کمتر بررسی شده است. این در حالی است که در بیشتر پروژه ها ستون‌های سنگی به صورت شناور اجرا می‌شوند. بنابراین در این تحقیق سعی شده است با استفاده از آزمایش‌های بزرگ مقیاس ظرفیت باربری ستون‌های سنگی شناور در دو حالت مسلح و غیر مسلح در طول و قطرهای مختلف مورد بررسی قرار گیرد. طول ستون‌های سنگی به گونه ای انتحاب شده است که اثر مسلح کننده ها روی هر دو نوع ستون سنگی کوتاه و بلند در حالت شناور مورد ارزیابی قرار گیرد.

روش انجام آزمایش و برنامه آزمایش‌ها

مطابق شکل (۱) برای انجام این تحقیق از یک مخزن بزرگ مقیاس به ابعاد ۱۲۰*۱۲۰*۹۰ سانتیمتر به عنوان مخزن اصلی استفاده گردید. Seling وMcKee [15] و Chummer [16] نشان دادند که گوه گسیختگی ایجاد شده در زیر پی تا فاصله حدود ۲–۲/۵ برابر عرض پی از مرکز پی به اطراف گسترده می‌شود. در تحقیق حاضر فاصله دیوارهای مخزن تا مرکز پی ۳ برابر عرض صفحه بارگذاری است بنابراین خطوط لغزش به دیواره های مخزن نمی‌رسد و ابعاد مخزن مناسب است. ستون‌های سنگی دارای قطر ٦٠ و طول‌های ۲۰۰، ۳۵۰ میلی‌متر (نسبت طول به قطر به ترتیب ۳/۳ و ۵/۸) و قطر۸۰ و طول ٤۰۰ میلی‌متر (نسبت طول به قطر ۵) می‌باشد. ابعاد ستون سنگی به گونه ای انتخاب شده اند که علاوه بر بررسی اثرات طول و قطر ستون سنگی دو نوع کوتاه و بلند از ستون سنگی شناور داشته باشیم. برای جلوگیری از هرگونه تغییرشکل در مرزهای

انتهایی مدل جداره های مخزن در هر چهارطرف از نوع فلزی ضخیم بوده و صلب در نظر گرفته شده است. از آنجایی که ساخت رس نرم در مخزن به روش کنترل وزن مخصوص است، جداره های مخزن به فاصله ۵ سانتیمتر درجه بندی شده است و لایه های رس نرم پس از وزن کردن در لایه‌های ۵ سانتیمتری ریخته و کوبیده شده است.



شکل ۱ شماتیک قاب بارگذاری، مخزن و نمونه

سیستم بارگذاری شامل قاب بارگذاری، سیستم اعمال بار، صفحه بارگذاری و سیستم جمع آوری داده‌ها می‌باشد. سیستم جمع آوری اطلاعات شامل کامپیوتر، سیستم ثبت داده ها،۲ عدد جابجایی سنج و ۲ عدد نیرو سنج است. ۲عدد جابجایی سنج بر روی صفحه بارگذاری قرار میگیرند تا مقدار جابجایی را ثبت کرده و اگر چرخش احتمالی در صفحه بارگذاری اتفاق افتاد آن را مشخص کنند. یک نیروسنج به ظرفیت ۳۰۰۰ کیلوگرم نیروی کل وارد بر صفحه بارگذاری را نشان میدهد و یک نیروسنج مینیاتوری به ظرفیت ۵۰۰ کیلوگرم بر روی ستون سنگی قرار گرفته و نیروی موجود در ستون سنگی را ثبت کرده و از آن برای محاسبه ضریب تمرکز تنش استفاده شده است بارگذاری بر اساس کنترل جابجایی بوده و سرعت آن ۱ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شده است. صفحه بارگذاری به قطر ۲۰ سانتیمتر و ضخامت ۳ سانتیمتر بوده و جنس آن از فولاد سخت میباشد. صفحه بارگذاری به گونه ای قرار میگیرد که مرکز آن روی مرکز ستون سنگی قرار گیرد. شکل (۲) مخزن، قاب بارگذاری، موتور سروو، صفحه بارگذاری و سنسورهای مربوطه را نشان می‌دهد.

همه آزمایش‌ها تا نشست کامل صفحه بارگذاری به اندازه ۵۰ میلی‌متر ادامه یافته است. نسبت سطح ستون سنگی برابر مساحت افقی ستون سنگی به مساحت صفحه بارگذاری تعریف می شود. در تحقیق حاضر۷ آزمایش بزرگ مقیاس انجام شده است. قابل ذکر است که آزمایش‌های کنترل برای اطمینان از تکرارپذیری و ثابت بودن نتایج نیز انجام شده است که نتایج مطابقت خوبی با یکدیگر داشتند. خلاصه برنامه آزمایش‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۲ مخزن و دستگاه بارگذاری و ثبت بار

جدول ۱ برنامه آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق

شماره آزمایش	نام آزمایش	نسبت طول به قطر	نسبت ناحیه اصلاح شده (٪)	مشخصات آزمایش
۱	Clay	-------	------	بدون ستون سنگی
۲	OSC6-20	۳/۳	۹	ستون سنگی معمولی با قطر ٦۰ میلی‌متر و طول ۲۰۰ میلی‌متر
۳	OSC6-35	۵/۸	۹	ستون سنگی معمولی با قطر ٦۰ میلی‌متر و طول ۳۵۰ میلی‌متر
٤	OSC8-40	۵/۰	١٦	ستون سنگی معمولی با قطر ۸۰ میلی‌متر و طول ٤۰۰ میلی‌متر
۵	ESC6-20	۳/۳	۹	ستون سنگی مسلح با قطر ٦۰ میلی‌متر و طول ۲۰۰ میلی‌متر
٦	ESC6-35	۵/۸	۹	ستون سنگی مسلح با قطر ٦۰ میلی‌متر و طول ۳۵۰ میلی‌متر
۷	ESC8-40	۵/۰	١٦	ستون سنگی مسلح با قطر ۸۰ میلی‌متر و طول ٤۰۰ میلی‌متر

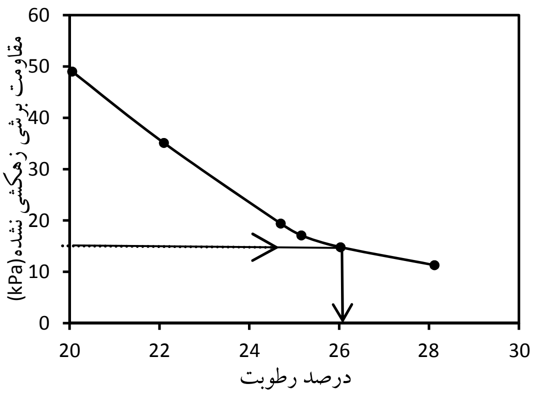
مصالح مصرفی

مصالح رسی و شنی. مشخصات رس مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۲) نشان داده شده است.در کارهای واقعی معمولا اگر خاک اطراف ستون سنگی دارای مقاومت برشی کمتر از ۱۵ کیلوپاسکال باشد مهندسین برای جلوگیری از انبساط جانبی از غلاف ژئوتکستایل استفاده می کنند.[5,6] بنابراین در این تحقیق مقاومت برشی ۱۵ کیلوپاسکال برای رس نرم در نظر گرفته شد. برای انتخاب درصد رطوبت مورد نیاز برای رسیدن به مقاومت برشی زهکشی نشده ۱۵ کیلوپاسکال، آزمایش‌های فشاری‌محدودنشده (تک محوری) مطابق با استاندارد ASTM D 2166 روی درصد رطوبت‌های مختلف انجام گرفت. نمونه های استوانه ای آزمایش دارای قطر ۳۸ میلی‌متر و ارتفاع ۹۰ میلی‌متر بودند. همانطور که در شکل (۳) مشخص است برای رسیدن به مقاومت برشی زهکشی نشده ۱۵ کیلوپاسکالدرصد رطوبت ۲٦ مورد نیاز است.

برای انتخاب مصالح شنی ستون سنگی شنها از الک ۲ و ۱۰ میلی‌متر گذرانده شدند. بعد از محاسبه حداقل و حداکثر وزن مخصوص خشک، مقدار وزن مخصوص برای مصالح ستون سنگی ١٦ انتخاب گردید که دارای تراکم نسبی ۷۱ درصد می‌باشد. برای محاسبه زاویه اصطکاک داخلی مصالح دانه‌ای از آزمایش سه محوری استفاده گردید. مشخصات شن مورد استفاده در جدول (۳) و نمودار دانه بندی رس و شن در شکل (٤) نشان داده شده است.

جدول ۲ مشخصات رس

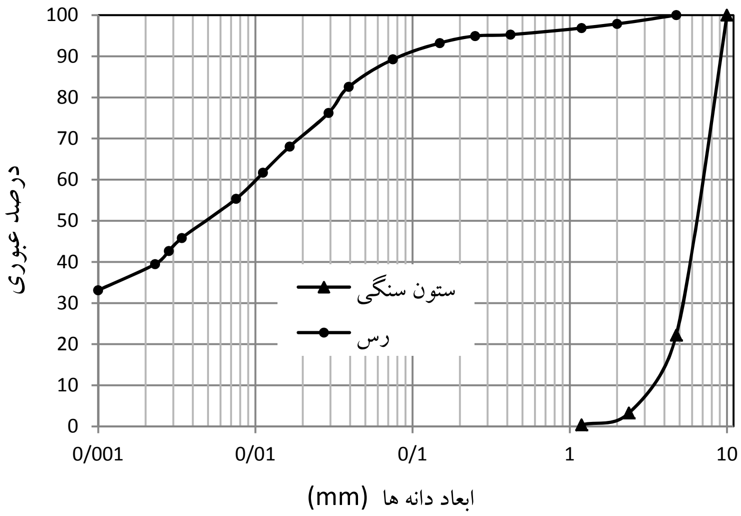
مقدار	پارامتر
۲/۷	چگالی ویژه
۳۱	حد مایع
۱۸	حد خمیری
۱۳	شاخص خمیری
۱۷	درصد رطوبت بهینه
١٦/۵kN/m3	حداکثر وزن مخصوص خشک
۱۹/۵ kN/m3	وزن مخصوص مرطوب
۱۵kPa	مقاومت برشی زهکشی نشده
CL	طبقه بندی خاک



شکل ۳ تغییر مقاومت برشی زهکشی نشده رس در درصد رطوبت‌های مختلف

جدول ٣ مشخصات مصالح ستون سنگی

پارامتر	مقدار
چگالی ویژه	٢/٦
حداکثر وزن مخصوص خشک	١٦/٧ kN/m3
حداقل وزن مخصوص خشک	١٤/٥ kN/m3
وزن مخصوص در تراکم نسبی ٧١٪	١٦ kN/m3
زاویه اصطکاک داخلی در تراکم ٧١٪	٤٧ درجه
ضریب یکنواختی	٢
ضریب انحنا	١/٢٣
طبقا بندی در سیستم متحد	GP



شکل ٤ نمودار دانه بندی رس و مصالح ستون سنگی

مشخصات مسلح کننده ها. انتخاب نوع مسلح کننده‌ها با توجه به اثر مقیاس مدل تعیین می‌گردد. طبق قوانین اثر مقیاس که توسط Iai [17] ارائه شده است ارتباط سختنی مسلح کننده‌های واقعی و مدل با توجه به رابطه (١) بیان می‌شود.

$$J_p = J_m \lambda^2 \quad (١)$$

در این رابطه J_p سختی مسلح کننده هـای واقعـی، J_m سختی مسلح کننده های مدل و $\frac{1}{\lambda}$ مقیـاس مـدل بـه واقعیت می‌باشد.

همچنین Dash and Bora [18]، [6] Gazavi and Nazariafshar و Hong et al [19] در تحقیق خود نشان دادند که نسبت سختی مسلح کننده در مدل $(\frac{1}{\lambda})^2$ برابر سختی مسلح کننده واقعی باید باشد.

سختی ژئوتکستایل‌ها در واقعیت بین ٥٠ تا ٢٠٠٠ کیلونیوتن بر متر میباشد Hong et al [19] و در این تحقیق از مقیاس $\frac{1}{10}$ استفاده گردیده است. بنابراین طبق اثر مقیاس سختی مسلح کننده ها انتخاب و مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات مسلح کننده ها در

جدول (٤) ارائه شده است.

جدول ٤ مشخصات مسلح کننده ها

ژئوتکستایل	پارامتر
پلی پروپیلن	نوع ماده kN/m
۹	مقاومت کششی نهاییkN/m
۵۵	کرنش در مقاومت نهایی(درصد)
١٦/٤	سختی کششیkN/m
۱	ضخامتmm
۱٤۰	وزن واحد سطح g/m^2

ساخت نمونه ها

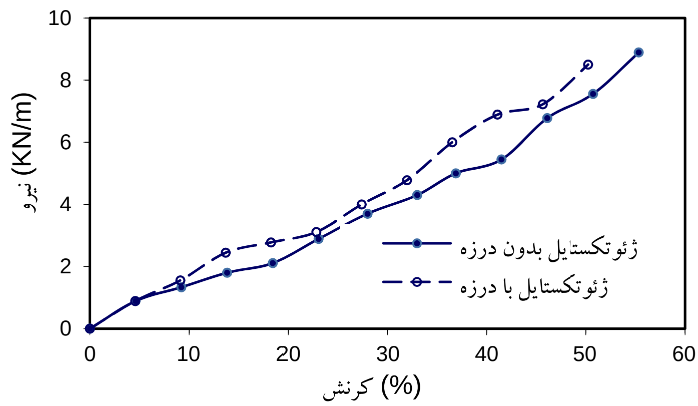
ساخت مخزن رسی. ابتدا خاک رس مورد نظر از سرند با چشمه ۱ سانتی‌متر عبور داده شد تا هرگونه ناخالصی و کلوخه ها جداسازی شود رطوبت اولیه رس به دقت اندازه گیری شد تا میزان آب مورد نیاز برای رسیدن به رطوبت ٢٦ درصد اندازه‌گیری شود. خاک رس به صورت لایه های حدود یک سانتی‌متری در مخزن آماده سازی ریخته شد و آب مورد نیاز برای رسیدن به رطوبت ٢٦ درصد با آبپاش مخصوص به طور یکنواخت روی هر لایه پاشیده شد. سپس مخزن نمونه توسط نایلون پوشانده شده و یک هفته به آن زمان داده شد تا به رطوبت یکنواخت برسد. نایلون‌ها باعث می‌شوند تا از هرگونه تبادل رطوبت بین جداره های مخزن با هوا جلوگیری شود. برای اطمینان از رسیدن رطوبت خاک به ٢٦ درصد از نقاط مختلف خاک آزمایش رطوبت انجام شد. نتایج نشان داد که در تمام آزمایش‌ها تعیرات رطوبت کمتر از یک درصدبوده است. مخزن اصلی ساخت نمونهدر فواصل ۵ سانتی‌متر در عمق در هر چهار طرف مخزن درجه بندی شده است تا نمونه رس نرم در آن به روش کنترل وزن مخصوص و در لایه های به ضخامت ۵ سانتی‌متر کوبیده و ساخته شود. قبل از انجام هر آزمایش دیواره های مخزن با یک لایه نازک گریس پوشانده شد تا اصطکاک بین رس و دیواره مخزن تا حد ممکن کاسته شود. خاک رس برای رسیدن به وزن مخصوص ۱۹/۵ کیلونیوتن بر متر مکعب وزن شده و در لایه های ۵ سانتی‌متری در مخزن اصلی کوبیده شد. با استفاده از یک چکش مخصوص به ابعاد ۱۵۰*۱۵۰ میلی‌متر و وزن ۱۰ کیلوگرم لایه ها برای رسیدن به ضخامت ۵ سانتی‌متر مورد تراکم قرار گرفت. برای تراکم بهتر واتصال مناسب لایه ها به یکدیگر و همچنین خروج بهتر هوا و کاهش تخلخل، در زیر چکش ۵ میلگرد فولادی به قطر ۱۰ میلی‌متر و طول ۲۰ میلی‌متر قرار داده شد. لایه ها برای رسیدن به ارتفاع کل ۵۰ سانتیمتر مورد تراکم قرار گرفته و سطح نهایی رس نرم تسطیح شد تا سطحی کاملا تراز و بدون حفره ایجاد شود. این روش ساخت برای تمام آزمایش‌ها به طور مشابه تکرار گردید. در تمام طول آزمایش‌ها کنترل رطوبت از مخزن انجام شده تا از مقدار رطوبت و یکنواختی آن اطمینان حاصل شود. نتایج آزمایش‌های رطوبت نشان داد که در تمام آزمایش‌ها تغییرات درصد رطوبت کمتر از یک درصد بوده است. برای اطمینان بیشتر از مقامت زهکشی نشده نمونه رس نرم بعد از انجام هر آزمایش، آزمایش فشاری محدود نشده بر روی نمونه های رسی مجددا انجام گرفت. در تمام آزمایش‌های فشاری محدود نشده نتایج آزمایش‌ها موید وجود مقاومت برشی زهکشی نشده ۱۵ کیلوپاسکال در درصد رطوبت ٢٦ درصد بود.

ساخت ستون سنگی مسلح و غیر مسلح. تمام ستونهای سنگی در مرکز مخزن اصلی بزرگ ساخته شده است. برای ساخت ستون‌های سنگی از یک لوله بدون درز استیل تو خالی به قطر ٦ یا ۸ سانتی‌متر استفاده گردید. در تمام آزمایش‌ها سطح داخلی و خارجی لوله فولادی به روغن آغشته گردید تا از دستخوردگی خاک اطراف جلوگیری شود و خاک نیز به راحتی در درون لوله قرار گیرد. سپس لوله توخالی به صورت قائم بر روی خاک رس قرار گرفت و در درون آن فرو برده شد. بعد از رسیدن لوله به عمق مورد نظر با استفاده از یک اوگر مارپیچ فولادی، خاک درون لوله خالی شد. اوگر مارپیچ فولادی طوری طراحی شده است که قطر آن کمی کمتر از قطر داخلی لوله ساخت

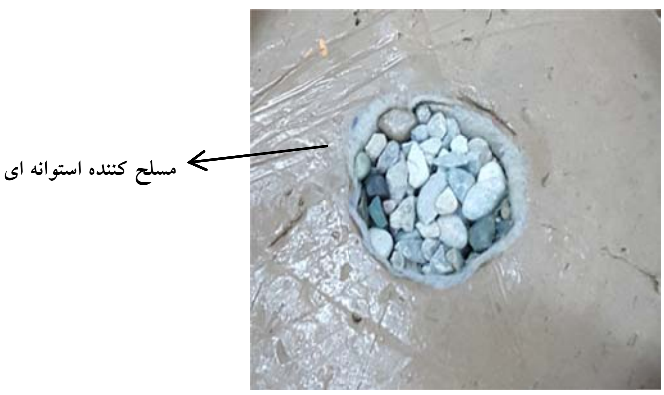
ستون سنگی باشد. با هربار چرخش اوگر مقداری رس از درون لوله جدا میشود. برای تخلیه بهتر و راحت تر خاک درون لوله، در هر مرحله حداکثر ۵۰ میلی‌متر از خاک درون لوله خالی شد. پس از خالی نمودن خاک درون لوله، لوله به آرامی و بدون انحراف از حالت قائم بیرون کشیده شد و مصالح ستون سنگی در ضخامت‌هایی به اندازه ۰/۵D (D قطر ستون سنگی) در داخل حفره ریخته و کوبیده شد. در تمام آزمایش‌ها وزن مخصوص مصالح ستون سنگی ۱٦ کیلونیوتن بر متر مکعب در نظر گرفته شد. برای رسیدن به وزن مخصوص یکنواخت، یک چکش به وزن ۲ کیلوگرم از جنس فولاد و شکل استوانه ای با قطر ۲۰ میلی‌متر از ارتفاع ۱۰ سانتیمتری با ۲۰ ضربه برای تراکم هر لایه استفاده گردید.

برای ساخت ستون سنگی مسلح ابتدا ژئوتکستایل به شکل مستطیل بریده شد و با چسب حرارتی از جنس پلی پروپیلن به صورت استوانه ساخته شد. مقدار روی هم قرار گرفتگی ژئوتکستایل در محل درز ۱/۵ سانتیمتر در نظرگرفته شد. لازم به ذکر است آزمایش‌های کششی انجام شده کفایت این نوع اتصال را تایید کرده و نشان می‌دهد وجود درزه که برای ساخت غلاف ژئوتکستایل با چسب حرارتی پوشیده شده است اثر نامطلوبی روی مقاومت ژئوتکستایل ندارد (شکل۵).

پس از ساخت، مسلح کننده دور لوله استیل قرار داده شده و همراه با لوله به زمین رانده شد. برای جلوگیری از حرکت مسلح کننده، اتصال مناسبی در پایین ایجاد شد. سپس مصالح دانه ای مانند روش قبل ریخته و کوبیده شد. در شکل (٦-الف) ستون سنگی غیر مسلح و در شکل (٦- ب) ستون سنگی مسلح نمایش داده شده است.



شکل ۵ رفتار نیرو-کرنش ژئوتکستایل با و بدون درز



(ب)



(الف)

شکل ٦ الف) ستون سنگی غیرمسلح، ب) ستون سنگی مسلح

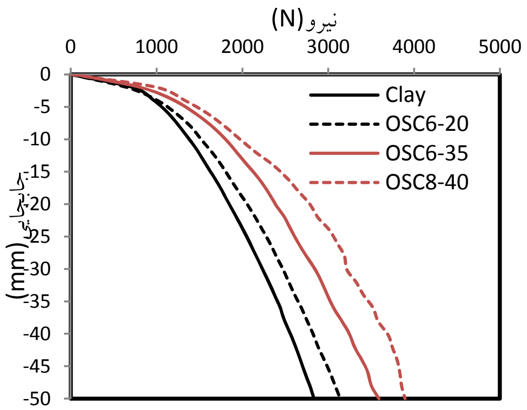
نتایج

رفتار بار- نشست نمونه‌ها. رفتار بار-نشست نمونه‌ها در نشست ۵۰ میلی‌متر بررسی شده است و حداکثر ظرفیت باربری در بررسی نسبت باربری بیان خواهد شد. ستونهای سنگی با قطر ٦۰ میلی‌متر با دو طول ۲۰۰ و ۳۵۰ میلی‌متر و ۸۰ میلی‌متر با طول ٤۰۰ میلی‌متر در دو حالت مسلح و غیر مسلح مورد آزمایش قرار گرفت. همانطور که در شکل (۷) مشخص است با بکارگیری ستونهای سنگیOSC6-20و OSC6-35 ظرفیت باربری در نشست ۵۰ میلی‌متر به ترتیب ۱۱ و ۲۷ درصد افزایش می یابد. این در حالی است که نمونه OSC8-40 افزایش ۳۸ درصدی را نشان میدهد. در تحقیقات Ali et.al [20] بیان شده است که با افزایش طول ستون سنگی تا نسبت طول به قطر برابر با ٦ ظرفیت باربری ستون سنگی افزایش می یابد و برای نسبتهای طول به قطر بیشتر از ٦ افزایش ظرفیت باربری اتفاق نمی افتد. در این تحقیق نسبت طول به قطر نمونه OSC6-20 برابر ۳/۳ و نمونه OSC6-35 برابر ۵/۸ می‌باشد و تایید می‌کند که با افزایش نسبت‌های طول به قطر کوچکتر از ٦، ظرفیت باربری افزایش خواهد یافت ولی این نتیجه گیری برای ستون‌های سنگی با قطر ثابت درست میباشد زیرا نمونه OSC8-40دارای نسبت طول به قطر ۵ است و ظرفیت باربری آن ۱۱ درصد از نمونه OSC6-35 با نسبت طول به قطر ۵.۸۳ بیشتر است. نسبت ناحیه اصلاح شده (Area Ratio) در ستونهای سنگی به صورت نسبت مساحت افقی ستون سنگی به مساحت افقی سلول واحد (ستون سنگی به همراه بخشی از خاک اطراف آن) تعریف میشود.هرچه این نسبت بیشتر باشد ناحیه اصلاح شده توسط ستون سنگی بیشتر خواهد بود. این نسبت در نمونه OSC8-40،۱/۷۸ برابر نمونه های OSC6-20 و OSC6-35 است و به همین دلیل اگرچه نسبت طول به قطر نمونه OSC8-40 کمتر از OSC6-35 است ولی ظرفیت باربری آن بیشتر است.بنابراین چنین به نظر میرسد که افزایش قطر ستون سنگی موثرتر از افزایش طول آن است. درواقع بهتر است به جای استفاده از ستون سنگی با طول زیاد و قطر کم، از ستون سنگی با قطر زیاد و طول مناسبی استفاده نمود که در آن گسیختگی سوراخ شونده رخ ندهد و نسبت طول به قطر بین ۵تا ٦ باشد.

در صورت مسلح نمودن ستونهای سنگی ظرفیت باربری افزایش پیدا میکند به طوری که نمونه های ESC6-20، ESC6-35 و ESC8-40به ترتیب افزایش ۲۰، ۳۸ و ٦۹ درصدی افزایش ظرفیت باربری در نشست ۵۰ میلی‌متر خواهند داشت (شکل۸). در واقع با بکارگیری غلاف ژئوتکستایل در اطراف ستون سنگی فشار جانبی در اطراف ستون سنگی افزایش می یابد و این غلاف مانع از فرو رفتن مصالح ستون سنگی در رس نرم اطراف می‌شود. به علت وجود این غلاف ژئوسنتتیک ، ستون سنگی یک تکیه گاه شعاعی خواهد داشت که با تحت کشش قرار گرفتن باعث افزایش ظرفیت باربری ستون سنگی میشود. در نشست ۵۰ میلی‌متر اختلاف درصد افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های OSC6-20، OSC6-35 و OSC8-40 قبل و بعد از تسلیح به ترتیب ۹ ، ۱۱ و ۳۱ درصد است بنابراین به نظر می‌رسد که مسلح نمودن ستون سنگی با قطر بیشتر، موثرتر از مسلح نمودن ستون سنگی با طول بیشتر استزیرا با بیشتر شدن قطر ستون سنگی کرنش شعاعی مسلح کننده افزایش می یابد. بنابراین کرنش کششی بسیج شده در مسلح کننده بیشتر شده و فشار دورگیر افزایش می یابد.

بعد از انجام هر آزمایش دوغاب گچ درون نمونه‌ها ریخته شد و در هنگام خالی نمودن مخزن نمونه های ستون سنگی تغییر شکل یافته به لحاظ نحوه و شکل خرابی تحت اثر بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت. مشاهدات عینی حاصل بیانگر آن بود که نحوه خرابی ستون سنگی OSC6-20 از نوع پانچ شدن

می‌باشد. در این حالت ستون سنگی در داخل رس نرم فرو می‌رود به همین دلیل ظرفیت باربری ستون سنگی زیاد نخواهد بود و تنها ۱۱ درصد افزایش باربری وجود دارد. در ستونهای سنگی OSC6-35 و OSC8-40 مشاهده شد که نحوه خرابی این ستون‌های سنگی از نوع انبساط جانبی است که در عمق ۲ تا ۲.۵ برابر قطر ستون سنگی اتفاق افتاد. در واقع با افزایش طول ستون سنگی، مصالحی که در قسمت پایینی ستون سنگی قرار دارند همچون بستری مناسب مانع از پانچ شدن قسمت بالایی مصالح ستون سنگی در رس نرم می‌شوند بنابراین ظرفیت باربری ستون سنگی افزایش می یابد و با نفوذ قسمت بالایی ستون سنگی در خاک رس نرم اطراف (انبساط جانبی)، ستون سنگی گسیخته می‌گردد.



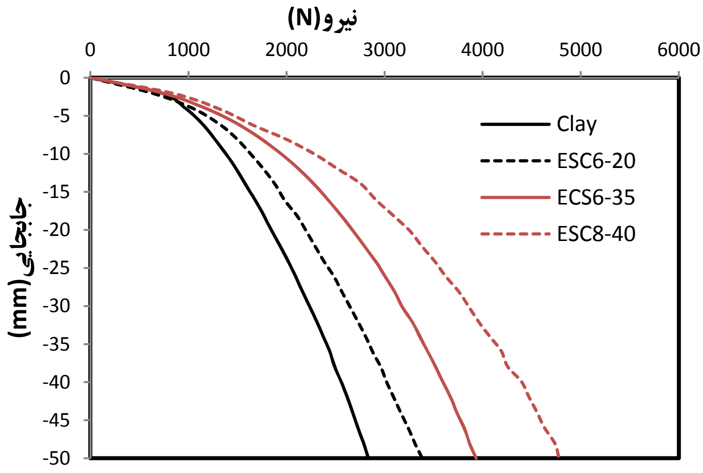
شکل ۷ منحنی بار نشست ستون سنگی معمولی

بررسی نسبت باربری. برای مقایسه بهتر رفتار نمونه‌ها، نمودار نسبت باربری (LR) در برابر نشست صفحه بارگذاری رسم شده است. نسبت باربری عبارت است از:

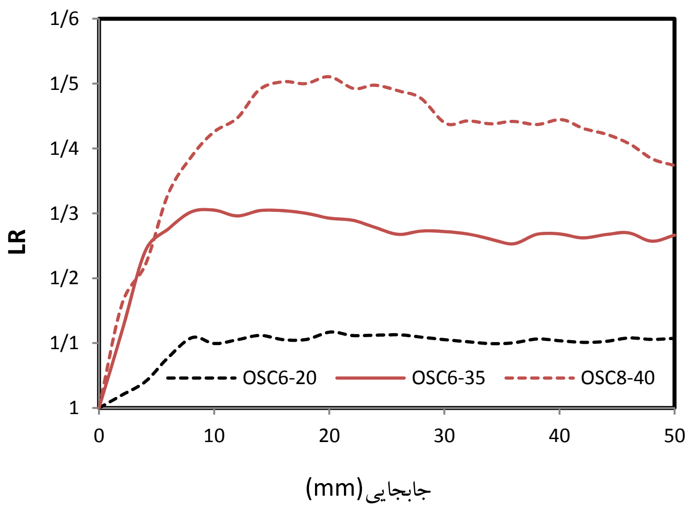
$$LR = \frac{\text{ظرفیت باربری خاک اصلاح شده در نشست‌های مختلف}}{\text{ظرفیت باربری رس نرم در نشست‌های مختلف}}$$

در شکل (۹) نمودار نسبت باربری ستون‌های سنگی غیر مسلح ارائه شده است. همانطور که مشخص است حداکثر مقدار این نسبت برای نمونه های OSC6-20،OSC6-35وOSC8-40 به ترتیب برابر با ۱.۱۱، ۱.۳۰ و ۱.۵۱ می‌باشد که نشان دهنده حداکثر میزان باربری در کل نشست است. همانطور که مشخص است نمونه OSC8-40 که دارای قطر ۸۰ میلی‌متر است بیشترین نسبت باربری را دارد. همچنین حداکثرنسبت باربری ستون سنگی OSC6-20 در نشست حدود ۸ میلی‌متر رخ میدهد و پس از آن تقریبا ثابت میماند. حداکثر نسبت باربری ستون های سنگی OSC6-35 و OSC8-40 نیز به ترتیب در نشست حدود ۱۰ و ۱۶ میلی‌متر اتفاق می افتد.

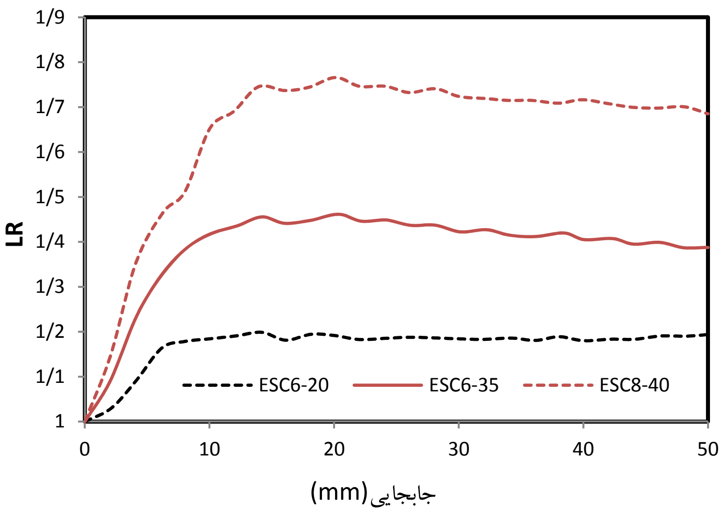
شکل (۱۰) نمودار نسبت باربری نمونه ستون سنگی مسلح را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است با به کارگیری مسلح کننده ژئوتکستایلی به دور ستون سنگی نسبت باربری افزایش می یابد به طوری که حداکثر نسبت باربری ستون‌های سنگی ESC6-20، ESC6-35 و ESC8-40 به ترتیب۱.۲۰، ۱.۴۷ و ۱.۷۶ می‌باشد که افزایش ۸، ۱۳ و ۱۷ درصدی را نسبت به حالت غیر ممسلح نشان می‌دهد. درواقع از آنجایی که گسیختگی ستون سنگی OSC6-20 از نوع سوراخ کننده است، تسلیح غلاف ژئوتکستایل به دور ستون سنگی اثر کمتری دارد و بیشترین اثر به کار گیری مسلح کننده دورگیر در نمونه هایی است که گسیختگی از نوع انبساط جانبی دارند. به نظر میرسد با استفاده از ستون سنگی مسلح به ژئوتکستایل، حداکثر مقدار نسبت باربری در جابجایی های بیشتری از صفحه بارگذاری اتفاق می افتد به طوری که برای نمونه های ESC6-20، ESC6-35 و ESC8-40 حداکثر مقدار نسبت باربری به ترتیب در جابجایی‌های ۱٤، ۲۰ و ۲۰ میلی‌متر روی می‌دهد. بنابراین با توجه به افزایش نسبت باربری نمونه های مسلح می‌توان نتیجه گرفت که نمونه های مسلح سختی بیشتری از نمونه های غیر مسلح دارند و علاوه بر تحمل بیشتر بار می‌توانند افزایش نسبت باربری خود را تا جابجایی های بیشتری حفظ نمایند.



شکل ۸ منحنی بار نشست ستون سنگی مسلح



شکل ۹ منحنی نسبت باربری (LR) ستون سنگی معمولی



شکل ۱۰ منحنی نسبت باربری(LR) ستون سنگی مسلح

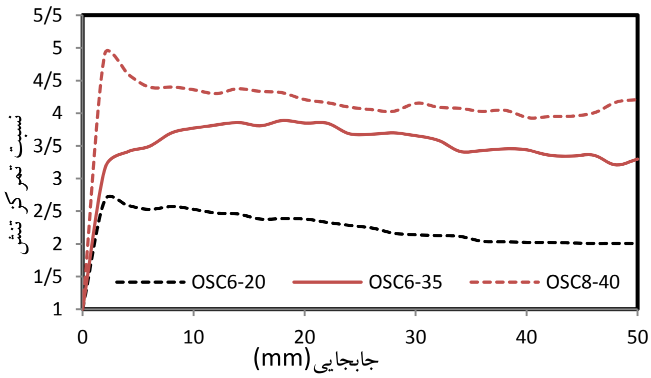
نسبت تمرکز تنش. از آنجایی که نشست سطح زمین و خاک اطراف تقریبا یکسان است بار با نسبت سختی ستون سنگی و خاک اطراف آن پخش می‌شود. از آنجایی که سختی ستون سنگی از سختی خاک رس نرم اطراف آن بیشتر است سهم باربری ستون سنگی بیشتر از خاک اطراف آن بوده و در نتیجه تنش موجود در ستون سنگی بیشتر از خاک اطراف آن می‌باشد. در ادبیات فنی تعدادی از محققین مانند Ghazavi and nazari afshar [6]، Fattah et al [21] و Murugesan and Rajagopal [22] با اندازه گیری تنش موجود در ستون سنگی و خاک اطراف آن به بررسی نسبت تمرکز تنش در ستون سنگی پرداخته اند. تعیین این پارامتر در روش های طراحی ستون سنگی بسیار مهم است. مقدار بار وارده به ستون سنگی ملاک و معیار مهمی از موثر بودن روش ستون سنگی می‌باشد. در ادبیات فنی از پارامتر نسبت تمرکز تنش در طراحی‌ها استفاده می‌گردد. نسبت تمرکز تنش عبارت است از:

$$n = \frac{\text{تنش در ستون سنگی}}{\text{تنش در رس نرم اطراف ستون سنگی}}$$

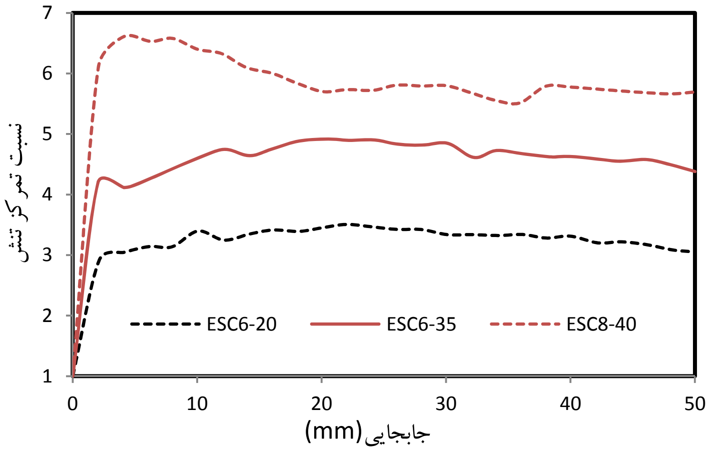
در این تحقیق با قرار دادن یک حفره در پشت و مرکز صفحه بارگذاری جهت قرارگیری یک نیروسنج مینیاتوری روی ستون سنگی میزان بار وارده به ستون سنگی اندازه گیری شده و از آن برای اندازه گیری پارامتر نسبت تمرکز تنش استفاده شده است. به کمک این نیروسنج مینیاتوری بار موجود در ستون سنگی در هر لحظه از نشست قابل اندازه گیری است. قابل ذکر است که بار موجود در خاک اطراف ستون سنگی از تفاضل بار اصلی و بار موجود در ستون سنگی در هر لحظه از نشست اندازه گیری می‌شود.

همانطور که در شکل (۱۱) مشخص است حداکثر نسبت تمرکز تنش در ستون‌های سنگی OSC6-20، OSC6-35 و OSC8-40 به ترتیب ۲/۵۷ ، ۳/۸۸ و ٤/۸۳ میباشد و نشان میدهد که با افزایش طول و قطر ستون سنگی سهم باربری ستون سنگی نسبت به خاک اطراف بیشتر می‌شود زیراسختی ستون سنگی بیشتر شده است.

شکل (۱۲) تغیرات نسبت تمرکز تنش در مقابل نسبت نفوذ ستون سنگی مسلح را نشان میدهد. همانطور که مشخص است با مسلح نمودن ستون سنگی نسبت تمرکز تنش در تمام نمونه ها افزایش می یابد به طوری که این نسبت در نمونه های ESC6-20، ESC6-35 و ESC8-40 به ترتیب به ۳/٤۱، ٤/۹۱ و ٦/۸۰ میرسد. در واقع درصورت استفاده از غلاف ژئوتکستایل مقدار انبساط جانبی کاهش می یابد و این عامل مهمی در افزایش باربری ستون سنگی است. همچنین میزان نسبت تمرکز تنش بعد از رسیدن به مقدار حداکثر، با افزایش نشست صفحه بارگذاری کاهش می یابد. دلیل کاهش نسبت تمرکز تنش در نشستهای زیاد میتواند به علت گسیخته شدن مصالح ستون سنگی به دلیل انبساط جانبی یا فرو رفتن مصالح در خاک اطراف ستون سنگی و همچنین سخت تر شدن خاک اطراف ستون سنگی با افزایش نشست باشد.



شکل ۱۱ تغیرات نسبت تمرکز تنش در مقابل نسبت نفوذ ستون سنگی معمولی



شکل ۱۲ تغییرات نسبت تمرکز تنش در مقابل نسبت نفوذ ستون سنگی مسلح

نتایج حاصل

در این تحقیق سعی شده است با استفاده از آزمایش‌های بزرگ مقیاس آزمایشگاهی ظرفیت باربری ستونهای سنگی شناور در دو حالت مسلح و غیر مسلح در طول و قطرهای مختلف مورد بررسی قرار گیرد. در عمل طول ستونهای سنگی آنقدر زیاد نیست که به لایه مقاوم برسد و در بیشتر موارد ستون سنگی از نوع شناور است.در بیشتر تحقیقات گذشته ستون‌های سنگی بر روی بستر صلب قرار گرفته اند و تاثیر ستون‌های سنگی شناور کمتر بررسی شده است. برای انجام این تحقیق از یک مخزن بزرگ مقیاس به ابعاد ۱۲۰*۱۲۰*۹۰ سانتیمتر به عنوان مخزن اصلی استفاده گردید. ستونهای سنگی دارای قطر ٦۰ و طولهای ۲۰۰ ،۳۵۰ میلی‌متر(نسبت طول به قطر به ترتیب ۳/۳ و ۵/۸) و قطر۸۰ و طول ٤۰۰ میلی‌متر(نسبت طول به قطر ۵) میباشد. ابعاد ستون سنگی به گونه ای انتخاب شده اند که علاوه بر بررسی اثرات طول و قطر ستون سنگی دو نوع کوتاه و بلند از ستون سنگی شناور داشته باشیم. با توجه به آزمایش‌های انجام گرفته به نتایج کلی زیر میتوان اشاره نمود:

۱. با بکارگیری ستون‌های سنگی معمولی ظرفیت باربری افزایش می یابد و با افزایش طول و قطر ستون سنگی کارایی ستون سنگی بهتر می‌شود. این تحقیق تایید می‌کند که با ثابت بودن قطر ستون سنگی و با افزایش نسبت‌های طول به قطر کوچکتر از ٦، ظرفیت باربری افزایش خواهد یافت.

۲. با وجود اینکه نمونه‌های OSC6-35 و ESC6-35 نسبت طول به قطر بیشتری از نمونه های مشابه ولی با قطر ۸۰ میلی‌متر دارند ولی دارای ظرفیت باربری کمتری هستند. بنابراین به نظر می‌رسد که افزایش قطر ستون سنگی موثرتر از افزایش طول آن است. در واقع بهتر است به جای استفاده از ستون سنگی با طول زیاد و قطر کم، از ستون سنگی با قطر زیاد و طول مناسبی استفاده نمود که در آن گسیختگی سوراخ شونده رخ ندهد.

۳. مشاهدات بعد از آزمایش نشان داد که نحوه خرابی ستون سنگی OSC6-20 از نوع پانچ شدن و ستون سنگی OSC6-35 و OSC8-40 از نوع انبساط جانبی است.در واقع با افزایش طول ستون سنگی مصالحی که در قسمت پایینی ستون سنگی قرار دارند همچون بستری مناسب مانع از پانچ شدن قسمت بالایی مصالح ستون سنگی در رس نرم میشوند و گسیختگی از نوع انبساط جانبی خواهد بود.

٤. با بکارگیری غلاف ژئوتکستایل در اطراف ستون سنگی فشار جانبی در اطراف ستون سنگی افزایش می یابد و این غلاف مانع از فرو رفتن مصالح ستون

سنگی در رس نرم اطراف شده و ظرفیت باربری افزایش خواهد یافت.

۵. به نظر میرسد که مسلح نمودن ستون سنگی با قطر بیشتر، موثرتر از مسلح نمودن ستون سنگی با طول بیشتر است.

٦. با افزایش طول و قطر ستون سنگی نسبت باربری و نسبت تمرکز تنش در ستون سنگی افزایش می یابد.

همچنین نسبت باربری ونسبت تمرکز تنش ستونهای سنگی مسلح بیشتر از حالت غیر مسلح است.بنابراین میتوان نتیجه گرفت که استفاده از مسلح کننده، افزایش قطر و افزایش طول باعث افزایش سختی ستون سنگی شده و کارایی ستون سنگی را بالا میبرد.

مراجع

1. Greenwood, D.A., "Mechanical improvement of soils below ground surface", In: *Proceedings of Ground Improvement Conference.* Institute of Civil Engineering, pp. 9-29, (1970).
2. Hughes JMO, Withers NJ, "Reinforcing of soft cohesivesoils with stone columns", Ground Engineering, Vol. 7(3), pp. 42–49, (1974).
3. McKenna JM, Eyre WA., and Wolstenholme DR, "Performance of anembankment supported by stone columns in soft ground", Geotechnique, Vol. 25(1), pp. 51-59, (1975).
4. Barksdale, R.D., Bachus, R.C., "Design and construction of stone column", Report No.FHWA/RD-83/026. National Technical Information Service, Springfield, Virginia, (1983).
5. Gniel, J. and Bouazza, A., "Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 27 (3), pp.167-175, (2008).
6. Ghazavi, M. and Nazari Afshar, J., "Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns", *Geotextiles and Geomembranes Journal,* pp.1-11, (2013).
7. FGSV (Fors chungs gesellschaft f. Straßen- und Verkehrswesen) "Merkblatt für die Unter grund verbesse rung durch Tiefenrüttler", FGSV, Köln, (1979).
8. Raju, V. R, "The Behaviour of Very Soft Soils Improved by Vibro Replacement", *Ground Improvement Conference,* London, (1997).
9. Van Impe, W. F., "Soil improvement techniques and their evolution", Balkema,Rotterdam, The Netherlands, (1989).
10. Christoulas, S.T., Bouckovalas, G. and Giannaros, C. H., "An experimental studyon model stone columns", *Soils and Foundations Journal*, Vol. 40(6), pp. 11-22, (2000).
11. Malarvizhi, S. N., and Ilamparuthi, K., "Load versus settlement of clay-bed stabilized with stone and reinforced stone columns", *Proceeding of the 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics,* GEOASIA, Seoul, Korea, pp. 322-329, (2004).
12. Murugesan, S., and Rajagopal, K., "Geosynthetic-encased stone columns: numerical evaluation", *Geotextiles and Geomembranes Journal*, 24(6), pp. 349-358, (2006).
13. Nazari Afshar, J. Ghazavi, M. "Experimental studies on bearing capacity of geosynthetic reinforced

stone columns", *Arabian Journal for Science and Engineering(AJSE),* DOI 10,1007/s13369-013-0709-8, (2013).

14. Nazari Afshar, J. Ghazavi, M. "A Simple analytical method for calculation of bearing capacity of stone-column", *International Journal of Civil Engineering,* Vol. 12(1) Transaction B: Geotechnical Engineering, (2014).
15. Selig, E.T., McKee, K.E., "Static and dynamic behavior of small footings", *Journal of Soil Mechanics and Foundation.* Div. ASCE, Vol. 87 (6), pp. 29-47, (1961).
16. Chummer, A.V., "Bearing capacity theory from experimental results". *J. Soil Mech. Found. Div.* ASCE 98 (12), pp.1311-1324, (1972).
17. Iai, S., "Similitude for shaking table tests on soil-structure fluid models in 1ggravitational field. Soils and Foundations", 29 (1), pp.105-118, (1989).
18. Dash, SK., Bora, MC., "Improved performance of soft clay foundations using stone columnsand geocell-sand mattress", *Geotextiles and Geomembranes Journal,* 41, pp. 26-35, (2013).
19. Hong, Y.S., Wu, C.S, Yu, Y.S., "Model tests on geotextile-encased granular columns under 1-g and undrained conditions", *Geotextiles and Geomembranes Journal 44,* pp. 13-27, (2016).
20. Ali, K., Shahu, J.T., Sharma, K.G., "Behavior of reinforced stone columns in soft soils", *Indian Geotechnical Conference, GEOtrend,* IGS Mumbai Chapter & IIT Bombay, (2010).
21. Fattah, M. Y., Shlash, K. T., Al-Waily, M. J. M., "Stress concentration ratio of model stone columns in soft clays", *Geotechnical Testing Journal,* Vol. 34, No. 1, Paper ID GTJ103060, ASTM, Nov. 29 14:27:16 EST, (2010).
22. Murugesan, S. and Rajagopal, K., "Studies on the behavior of single and group of geosynthetic encased stone columns", *Journal of Geotechnical And Geo Environmental Engineering,* ASCE, Vol. 136(1), pp. 129-139, (2010).